

一种新型有限扫描空馈相控阵天线*

朱瑞平 何炳发

(南京电子技术研究所 南京 210013)

【摘要】 有限扫描单脉冲阵列是用于多目标跟踪捕获和精密测量雷达的一种相控阵天线。本文讨论了一种新型有限扫描空馈天线系统,详细论述了该系统的设计方法、阵面校准和测试结果。理论分析与实测结果非常吻合。

【关键词】 相控阵天线,有限扫描,单脉冲,空馈

A New Limited Scan Space Fed Phased Array Antenna

ZHU Rui-ping HE Bing-fa

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology Nanjing 210013)

【Abstract】 Limited scan monopulse array is a kind of the phased array antenna which is used in multi-targets tracking and precisely measuring radar. In this paper, a new limited scan space fed antenna system is discussed. The designed methods, the array align and the test results are presented into detail. The test results are agreed with the computer analysis.

【Key words】 phased array antenna, limited scan, monopulse, space fed

1 前 言

导弹中途瞄准和反洲际导弹的弹道导弹防御、火力控制和空中交通管制系统需要完整的半球覆盖区域和多目标跟踪。为了在保证高精度跟踪的同时,实现多目标的捕获和跟踪能力,采用将电扫描和精密天线转台相结合的折衷方法是比较满意的解决办法。

国外设想和研究了许多经济的有限电扫天线系统的设计方法,这些设计方法的差别主要是取决于天线系统所需的扫描角度。早期研究的方法大多数是反射面系统,如馈源横向移动的抛物面天线^[1],这种方法存在严重的彗形旁瓣和遮挡旁瓣。另外还有双反射器位移馈源^[2]、单反射器阵列馈源^[3]和双反射器阵列馈源^[4]等设计方法,以上这些设计方法所达到的扫描范围非常有限,通常仅可以达到几个到十几个波束宽度,并且扫描后增益下降很快、旁瓣电平和零值深度退化剧烈,测量精度下降极快。这些设计很难满足精密测量雷达的需要。

当有限扫描的范围超过几度时,可以采用非周期环栅阵,这种结构的阵列可以采用很大电尺寸的单元来减少扫描所需的单元数。而单元的非周期排列可以抑制由于间距大产生的栅瓣。但这些单元的尺寸也限制了扫描的范围,扫描角通常取为单元的半功率波束宽度。另外还有一些非周期阵的实现方法如变间距

阵、随机组合一些小尺寸单元等;本文主要讨论非周期环栅阵。

2 非周期环栅阵

由于非周期阵列可以采用较大的单元,对于相同的扫描角面所需的单元数要比规则栅格排列要少。而单元数少对于相控阵雷达天线而言就意味着其制造成本低,还意味着天线阵面重量轻、单元间距大结构易实现、移相器总的激励电流小、通风散热好。当然采用何种设计取决于对天线的要求,当最大扫描角小于20°时,非周期阵有着显著的优点;当最大扫描角超过40°时就没有优点了;在20°~40°之间非周期阵列的优势就不明显了,而从其它方面考虑则可能选用规则栅格排列。

非周期环栅阵单元大小的选择取决于扫描范围的要求和在最大扫描角上所允许的增益下降值。由于非周期阵中单元的间距较大,单元互耦弱,单元在阵中的方向特性和驻波特性与孤立单元非常接近;可以用孤立单元方向图的宽度来估算阵列扫描时天线增益的下降情况,并依据它来决定单元的大小。而单元数可以用总面积和单元面积之比来估算出来。

在相控阵设计中,单元的设计是特别关键的,因为天线的孔径效率为阵列的孔径效率和单元的孔径效率的乘积,所以提高单元的效率对提高相控阵天线的效

率是非常重要的。单元的设计对于非周期阵面单元的设计尤其重要,由于单元数少,单元所占面积大,而且非周期排列各个单元环境不完全一致;要提高单元的孔径效率往往是比较困难的,必须精心设计和实验。

虽然图 1 在整体上是非周期的,但局部上近似周期的,局部的周期性也会产生残余瓣瓣,瓣瓣功率电平是与阵面单元数成反比的(约为 $10/N$),在不扫描时单元的方向性会大大减小瓣瓣电平。抑制瓣瓣的方法有

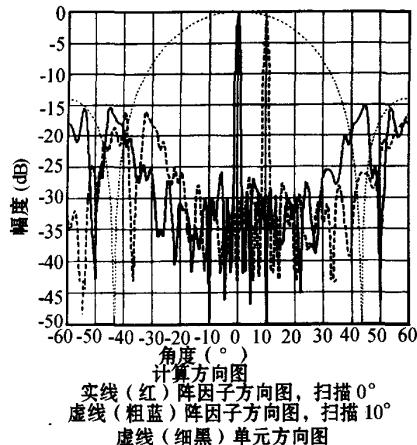


图 1 理论仿真阵列方向图和单元方向图

3 有限扫描平面波空馈阵

3.1 阵面

在相控阵天线中,阵面单元排列形式的选择是非常重要的,它与相控阵天线的性能紧密相关。在相控阵设计中,单元的排列形式和单元间距决定了阵面单元数的多少,也决定了相控阵的扫描性能;但这些都受到结构和相控阵成本的制约;相控阵的成本主要取决于单元成本和单元数的多少,因此降低成本关键是要在保证天线性能要求的前提下尽量减少单元数。另外单元少、单元间距大、单元间互耦小、结构上易实现,那么所需移相器就少即总的激励电流小、通风散热好。

但为了保证波束扫描开后的天线性能能满足要求,单元数又不能太少,考虑到结构的可实现性以及重量、成本、移相器总的激励电流、通风散热等因素,在满足指标要求的条件下,用尽量少的可控单元。从上面对天线的要求来看,天线的扫描范围有限,但效率和扫描后的增益下降要求很高,所以设计时必须优先考虑效率和扫描性能,另外考虑到相控阵成本和结构易实现性以及圆极化移相器等因素,采用了非周期环栅排列阵(图 2)。为了结构上安装方便整个阵面分成了 40 个子阵,阵面径向有 21 环,共有 1 380 个单元,子阵与

很多,子阵重叠法、变间距排列、非周期排列等。本文所讨论的天线采用了非周期环栅阵,从理论仿真计算出的图 1 中可以看出,即使单元间距达到了 1.3 个波长,而扫描 10°后由于这种排列阵列方向图的瓣瓣被抑制在 -15dB 以下,事实上加上单元方向图的作用,天线的瓣瓣可被抑制在 -22dB 以下。天线不扫描时瓣瓣被抑制在 -35dB 以下。

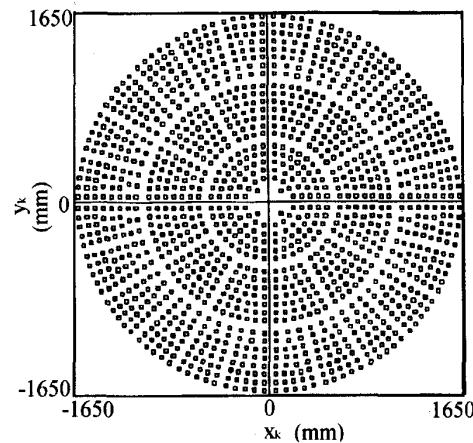


图 2 本文中的非周期环栅阵

子阵之间留有一定空间以便于结构安装,所以阵中的单元并没有占满整个阵面。

3.2 相控阵天线的馈电方式选择和效率

3.2.1 馈电方式的选择

相控阵天线的主要馈电方式选择直接关系到天线的效率,馈电方式主要有下面几种:

1) 强制馈电(又称为传输线馈电),其优点是容易实现需要的幅度分布,纵向尺寸小,但馈电网络复杂。

2) 空间馈电(又称光学馈电),这种馈电方式的优点是馈电简单,但纵向尺寸大,而且幅度较难控制。

空馈的方式主要有反射式和透镜式。透镜式空馈又可分为球面波馈电、球面波到平面波转换馈电和平面波馈电。反射式和球面波馈电结构简单但纵向尺寸大、效率低;球面波到平面波转换馈电和平面波馈电效率高,没有接收单元的方向性损失,而且纵向尺寸小但结构较复杂。上面几种馈电方式的效率以平面波馈电和球面波到平面波转换馈电为最高,其次是球面波透镜式馈电,而反射式空馈效率最低。从下面示意图 3 中可以看出,在采用反射式和球面波式馈电时由于所有的收集阵单元的法线方向并不都对准馈源来波方向,这样就会因接收阵单元方向性而造成接收漏失损耗^[5];对于大的单元由于单元方向性高,这个损耗将

会比较大。在球面波到平面波转换馈电和平面波馈电中,每一个收集阵单元法线方向都对准了馈电来波方向,所以就没有这个损失;但是球面波到平面波转换馈电由于中间需要电缆连接、会产生不稳定性和电缆损耗,故综合考虑以平面波馈电比较合适。

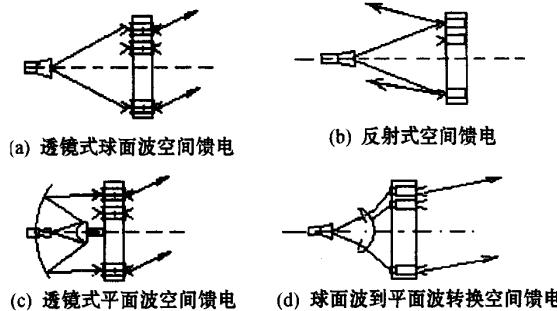


图3 空馈方式示意图

图4是本文所讨论的整个相控阵天线的示意图,空馈天线是一个双反射面单脉冲天线,馈源是一个单脉冲单口多模馈源。

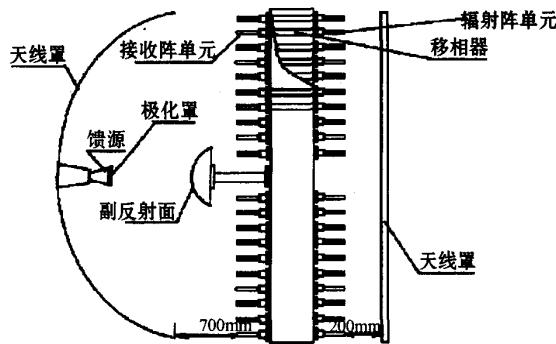


图4 有限扫描单脉冲空馈相控阵天线示意图

3.2.2 空馈相控阵天线的效率

相控阵天线的增益可以用类似于面天线的方式表示

$$G = \eta \cdot \frac{4\pi S_e}{\lambda^2} \quad (1)$$

其中: S_e 是相控阵天线的口径面积, λ 是工作波长。 η 是相控阵天线效率,它包括了移相器插入损耗等在内的所有有功和无功损耗,可以表示如下

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \cdot \eta_7 \cdot \eta_8 \cdot \eta_9 \cdot \eta_{10} \cdot \eta_{11} \cdot \eta_{12} \cdot \eta_{13} \quad (2)$$

从相控阵天线效率的组成来看,影响相控阵天线效率的因素比一般面天线要多得多,其中 $\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \cdot \eta_7$ 可以看作总的馈电效率,而 $\eta_3 \cdot \eta_8 \cdot \eta_9 \cdot \eta_{11} \cdot \eta_{12}$ 实际上是辐射阵总辐射效率, $\eta_{10} \cdot \eta_{13}$ 是

相控阵的有功损耗。详细的分析计算见参考文献[5]。其中: η_1 是馈电漏过效率; η_2 是收集阵单元效率; η_3 是辐射阵单元效率; η_4 是馈电照射遮挡效率; η_5 是失配效率; η_6 接收阵单元方向性造成的漏失损耗; η_7 极化失配效率; η_8 是幅相起伏损耗; η_9 是辐射口径利用效率; η_{10} 移相器插入损耗; η_{11} 单元位置公差损耗; η_{12} 是辐射口面遮挡效率; η_{13} 是其他因素造成的损耗。

表1 平面波空馈相控阵天线的效率

各 种 效 率	理 论 计 算	实 测 结 果
漏失效率	-0.3 dB	
馈电遮挡效率	-0.23 dB	
收集阵单元效率	-0.60 dB	
失配效率	-0.13 dB	-1.70dB
极化失配效率	-0.15 dB	
单元方向性漏失		
辐射口径利用效率	-0.86 dB	
辐射单元效率	-0.60 dB	
幅相起伏损耗	-0.15 dB	-1.8dB
位置公差损耗	-0.10 dB	
辐射口径遮挡效率	-0.13 dB	
移相器插入损耗	-1.0 dB	-0.90dB
其他因素损耗	-0.3 dB	-0.25 dB
总 计	-4.52 dB	-4.65 dB

3.3 收集阵单元和辐射阵单元

整个阵面1380个高增益辐射单元和收集阵单元按环栅阵排列的方案,收集阵单元和辐射阵单元通过圆极化铁氧体双模移相器、波导变换相联,收集阵和辐射阵单元是一一对应的并且是相同的,单元间距大于1.3个波长。

由于单元少,单元间距大,单元格面积大,采用一般喇叭单元效率低会导致相控阵增益降低。通过理论分析计算和实验,采用了介质加载辐射器提高单元增益(单元方向性),从而提高天线效率,并抑制阵列因子引起的瓣瓣。

单元格增益:14.3dBi,孤立单元增益:14.1dBi,阵中单元增益:13.8 dBi。

3.4 圆极化移相器

移相器在相控阵天线中是一个关键的设备,天线的扫描就是靠移相器实现的,移相器性能的好坏和波束控制电路的稳定性、准确性不光决定着天线的扫描性能,还影响天线的增益和副瓣。移相器相移量的控制精度直接影响天线的增益和副瓣。

本文所讨论的整个相控阵天线阵面上采用的是六位双模圆极化铁氧体移相器,其性能见表2。由于加工和工艺上的原因,影响圆极化移相器性能的因素很

多。在相控阵中单元、阵面、馈电天线和移相器的插入相移误差是可以通过近场测量得到修正,而移相器相移控制误差(包括波控系统的控制误差和移相器差移相误差)是无法得到修正的。因此在实施设计时,对有些误差可以适当放宽,而对有些误差必须严格控制;否则会影响天线指标如增益和副瓣的实现。

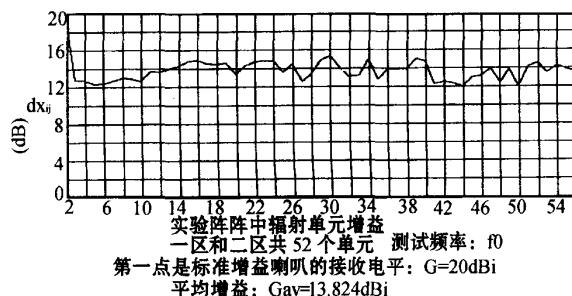


图 5 阵中单元增益

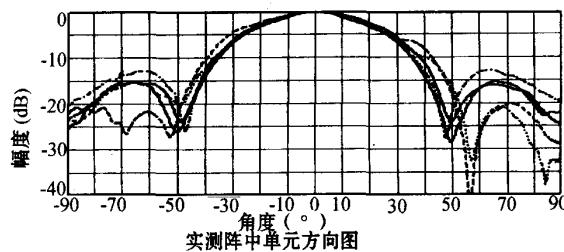


图 6 阵中单元方向图

表 2 圆极化移相器性能

项目	插入损耗	圆极化椭圆度	差相移 控制误差	耐功率
指标	1.0 dB	<1.5dB	均方根 误差 13°	平均: 30W 峰值: 5kW

3.5 阵面的幅相测量和相位校准

相控阵的相位校准也是一项非常重要的工作,它关系到相控阵天线的法向增益、方向图特性。首先要进行每一个单元幅度相位的检测,然后才是配相校准,而配相工作并不可一次完成,这是由于单元间的互耦、幅相分布的极化特性不一致以及铁氧体移相器的移相误差造成的。一般需要收敛二到三次。本文讨论的相控阵的幅相误差主要是有馈电天线的幅相误差、移相器的幅相误差、单元幅相误差及单元位置误差造成的结果。

3.5.1 阵面单元幅度相位的测量

由于采用了非周期环栅排列,使得相位的检测不能采用常规的方式,另外由于圆极化铁氧体移相器对左、右旋圆极化波和线极化的移相量不一样,选取合适的配相方式和采样方式及探头非常重要。在实际测量时,我们测量每个单元两种正交极化的幅度相位,这样

可以取得每个单元处场的所有的极化、幅相信息,在数据处理时不仅可以得到阵面的幅相分布,还可以分析阵面的极化特性。

3.5.2 阵面单元相位数据处理

得到测试数据后,通过分析处理求出每个单元的幅度和相位,由下面的公式计算出每个单元移相器所需要的控制相移量,提供给波控系统来控制移相器。表 3 列出了天线阵面相位校准前后,单元处相位的均方根误差。可以看出两次校准后的相位误差与移相器的控制误差非常接近,第一次校准后比校准前的相位误差改善很多,而第二次校准与第一次校准两者相差不大。远场测试结果也说明了近场阵面校准的效果(见图 8 和图 9)。

$$pavg = \sum_n \frac{phz_n}{N} \quad (3)$$

$$\Phi_n^j = pavg - phz_n + \Phi_n^{j-1} \quad (4)$$

其中: phz_n 第 n 个单元处的相位(控制相移量为 Φ_n^{j-1}), $pavg$ 整个阵面的平均相位, Φ_n^j 第 n 个单元移相器第 j 次配相的控制相移量, Φ_n^{j-1} 第 n 个单元移相器第 $j-1$ 次配相的控制相移量。

表 3 阵面校准前后的相位误差

校准次数	未校准	一次	二次
阵面相位误差(均方根值)	35.2°	13.7°	12.5°

3.6 结果

相控阵天线法向增益: 41.1dBi (0.340)

天线波束宽度 1.1°

和第一副瓣 <-22dB

差方向图的零值深度 <-30dB

和波瓣圆极化轴比 <1.3dB

差相对斜率 0.121/mrad

扫描范围 方位: ±10° 和增益下降 <1.5dB

俯仰: ±10° 和增益下降 <1.5dB

扫描: ±10° 时栅瓣 <-22dB

栅瓣位置距主瓣 >35°

扫描后的方向图见图 9 和图 10。

4 结语

本文讨论的目的是如何采用较少的单元数来实现有限扫描阵列的波束扫描,从而降低工程实现上的难度和相控阵天线的造价。采用大单元环栅阵设计的关键在于单元和馈电方式的选取。

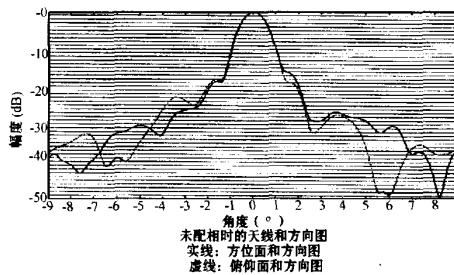
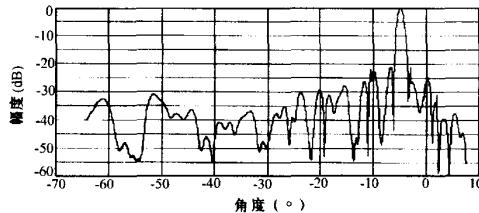


图7 阵面相位校准前的天线方向图

图9 天线方位面扫描方向图($f_0, -5^\circ$)

参 考 文 献

- 1 Ruze. Lateral-Feed Displacement in a Paraboloid, IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 1965; AP-13, (5): 660~665
- 2 Nihen,Kay. Optimum Dual-Reflector Antenna Design Investigation, Tech. Rept. RADC-TOR-63~318, 1963
- 3 C. Winter. Phase Scanning Experiments with Two-Reflector Antenna Systems. Proc. IEEE, 1968, 56 (11): 1984~1999
- 4 Fitzgerald. A limited electronically scanned Cassegrain antenna at Q-band. 1982 Intern. Symp. Digest, AP, 1984, 2: 435~438

(上接第 48 页)

图 10(a)、(b) 所示, 可看出理论计算与实测数据基本吻合, 其中天线后瓣的差异主要是由于计算中未考虑天线表面的绕射电流造成的。由图可以看出, 当飞行器水平飞行时, 该天线的主瓣波瓣中心与天线主轴方向一致, 从 E 面方向图可看出天线水平方向上 3dB 波瓣宽度约为 55°; 从 H 面方向图可看出, 天线垂直方向波瓣宽度达到约 67°。这样的方向图特性较好地解决了喷口火焰对信号的影响问题, 而且也保证了飞行器在复杂的机动飞行条件下的通信畅通。

参 考 文 献

- 1 高本庆. FDTD 方法. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 2 Gedney S D. An anisotropic perfectly matched layer-absorb-

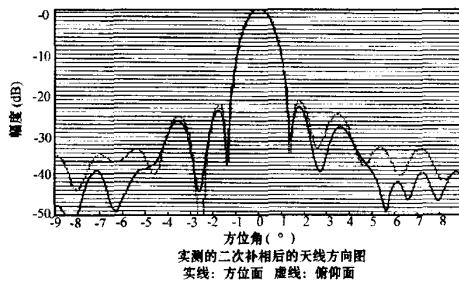
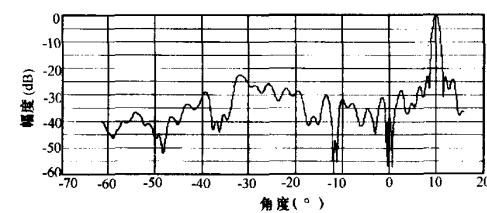


图8 阵面相位校准后(两次)的天线方向图

图10 天线俯仰角面扫描方向图($f_0, 10^\circ$)

5 朱瑞平, 等. 空馈相控阵天线的效率. 现代雷达, 1999, 21 (6): 71~76

朱瑞平 男, 高级工程师, 中国电子学会高级会员。1984 年毕业于西安电子科技大学电磁工程系。长期从事雷达天馈线系统的研制, 承担多项国家重点型号产品研制, 曾获部科技进步一等奖。目前主要从事单脉冲、空馈相控阵及固态有源相控阵天线系统的研制工作。

何炳发 男, 研究员级高级工程师, IEEE 会员, 中国电子学会高级会员。1983 年毕业于西安电子科技大学电磁工程系。长期从事雷达天馈线系统的研制, 承担多项国家重点型号产品研制。目前主要从事固态有源、空馈相控阵天馈线系统和 T/R 组件的研制工作。

ing medium for the truncation of FDTD lattices, IEEE Trans. Antennas Propagat, Dec. 1996, 44: 1630~1639

- 3 Luebbers R J, Chen L, Uno T, et al. FDTD calculation of radiation patterns, impedance, and gain for a monopole antenna on a conducting box, IEEE Trans. Antennas Propagat, Dec. 1992, 40: 1577~1583

王家齐 男, 1978 年生, 空军工程大学导弹学院电磁场与微波技术专业博士生。主攻方向是微波智能检测、电磁场的数值计算。

甄蜀春 男, 教授, 空军工程大学导弹学院电磁场与微波技术学科博士生导师。主要从事防空武器系统与微波技术、微波智能检测研究。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>